

氏 名	趙 相 俊
生 年 月 日	
本 籍	大韓民国
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	博甲第132号
学位授与の日付	平成7年3月25日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	エアフィルタユニット構造の最適化と超微粒子用高性能ろ材構造 の検討
論文審査委員	(主査) 江 見 準 (副査) 中 西 孝, 大 谷 吉 生 金 岡 千嘉男, 岡 島 厚

学位論文要旨

The pressure drop and flow distribution of a separator type air filter unit can be characterised by studying the filter element the bundle of which is the separator-type HEPA filter unit.

In the present work, similarity law for the flow channels with a porous media was discussed and the dimensionless parameters which determine the pressure drop were derived. The dimensionless pressure drop was presented as a generalized-pressure drop diagram in terms of dimensionless parameters. Furthermore, the results of numerical analysis for the two-and three-dimensional model filters were compared with those of experiments. It was found that, for a given configuration of filter element, there exists an optimum separator height that gives the minimum pressure drop. The pressure drop through filter medium determines the total pressure drop of the filter at a large separator height, while at a small separator height the friction in the flow channel dominates the total pressure drop. The prediction equation for optimum separator height h_{opt} which is the most important factor for designing filter unit, was presented as a function of filter media resistance coefficient C_m and filter depth L , as $h_{opt}=16.3L^{-0.721}C_m^{-0.279}$ for three-dimensional model filter. The optimum separator height is independent of the inlet air velocity. In case of small separator height, the pressure drop drastically decreases with increasing separator pleat angle, whereas, at a large separator height, the decrease in the pressure drop due to separator pleat angle change is not drastic. The changes in separator-pleat angle and media resistance coefficient affect the distribution of airflow velocity through the horizontal media only in the direction of the main air flow.

By numerical calculation for the staggered array of cylinders representang the fibrous media, single fiber efficiency was calculated at a low Peclet numbers. Although single fiber efficiency tends to approach to $(\pi/2 \alpha)^{1/2}$ with a decrease in Peclet numbers, the Langmuir

penetration equation still holds even at a small Peclet number. As packing density becomes smaller, the single fiber efficiency increases and pressure drop decreases. Therefore, filter performance index becomes larger with decrease in packing density. These theoretical results were conformed by the experiments data. Furthermore, experimental data suggested that particle rebound on the surface reduces the collection efficiency of filter when the particle is smaller than 3nm in diameter.

1. 緒言

電子産業、食品産業、製薬製剤産業の分野で微粒子による製品表面汚染は歩留まりや品質に影響する大きな課題となっている。特に、1GDRAMの生産を目指す半導体産業の作業空間ではナノメートルサイズの粒子、さらにはイオンまで除去する必要があると考えられる。これまでのような清浄空間を造り出すためには、比較的安価で、除去効率が高い繊維層フィルタが使われている。フィルタの性能を評価する因子としては、捕集効率、圧力損失、粉塵保持容量、耐久性、耐熱・薬品性などがあるが、高度に清浄化された空間の創出という観点からは、フィルタ性能は捕集効率と圧力損失に限定される。高い捕集効率は、フィルタろ材の厚みや充填率を増やすことにより容易に達成されるが、この方法では同時に圧力損失も増加してしまう。従って、高性能なフィルタを開発するためには、フィルタの圧力損失と捕集効率と同時に考慮し、低圧損、高効率のフィルタを目指す必要がある。これまで、ろ材については多くの研究が報告され、ろ材の捕集効率、圧力損失についてはほぼ推定できるようになっているが、ろ材を折り込んで製作されるフィルタユニットについての研究は少なく、その内部の流れと圧力損失の関係も明確にはされていない。

本研究では、このような観点から、Fig.1に示したセパレータ型高性能エアフィルタユニットの圧力損失と流れを代表できるモデルフィルタを提案し、このモデルに対して、数値解析と実験を行い、セパレータ型高性能フィルタの最適構造を検討する。また、微細繊維層ろ材に対するちどり配列繊維モデルを用い、特に超微粒子に対して低圧力損失、高効率を実現できるろ材構造について検討を加えた。

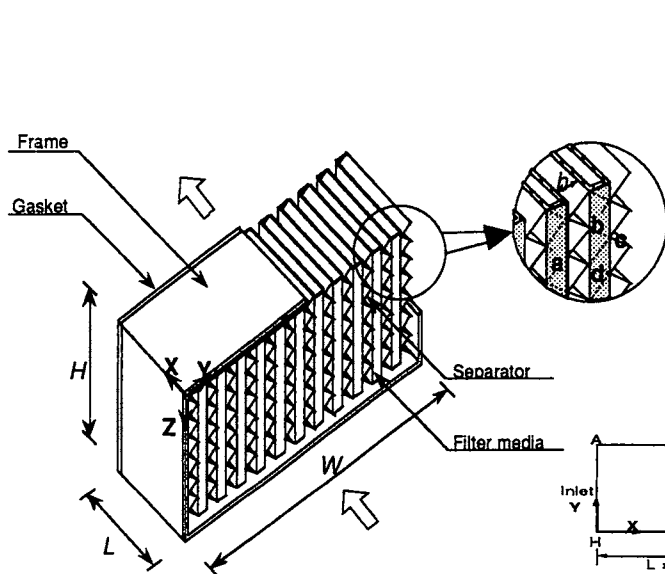


Fig. 1 Separator type filter unit

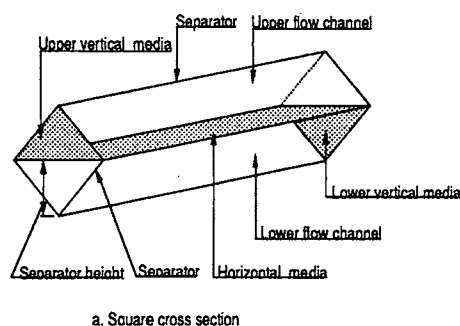


Fig. 2 model filter.

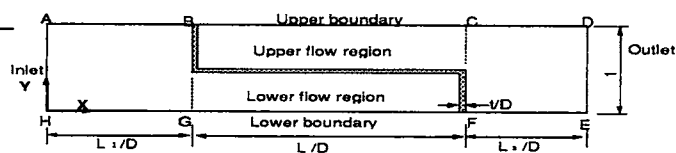


Fig. 3 Numerical calculation domain(dimensionless)

2. モデルフィルタの圧力損失の理論解析

モデルフィルタ内部の流れの無次元数値解析を、Fig.2に示した計算領域に対して行うことにより、セパレータ型フィルタの相似則を導出するとともに、フィルタの圧力損失を一般化した。モデルフィルタ内部の流れの相似性は、モデルフィルタの幾何学的構造を決定するパラメータである。フィルタの折り込み深さとセパレータ高さの比 L/D 、ろ材厚みとセパレータ高さの比 t/D (3次元モデルフィルタの場合は加えてセパレータの折り角 θ) の外に、 Re とろ材抵抗パラメータ $K_{MR} = C_m \mu D / \rho U_{in}$ が一定であれば保証される。

2次元モデルフィルタの場合について、 $L/D, t/D, Re, K_{MR}$ の各パラメータの関数として一般化された線図をFig.3に示す。

3. 2次元モデルフィルタの圧力損失特性

無次元解析より、フィルタユニットの圧力損失とそれを支配する無次元パラメータの関係をj知することはできたが、フィルタユニットの設計因子であるセパレータ高さ、ろ材折り込み深さ、ろ材抵抗係数などがどのようにフィルタの全圧力損失に影響するかをj知ることが困難である。セパレータ型高性能フィルタの圧力損失とその構造(セパレータ高さ、ろ材の抵抗、ろ材の折り込み深さ)の関係を明らかにするために、2次元モデルフィルタを用いて有次元数値解析を行い、実験結果と比較した。その結果、セパレータ型フィルタの圧力損失はろ材の圧力損失に構造抵抗が加わるため、ろ材のみの圧力損失より高くなり、セパレータ高さが大きい場合はろ材による圧力損失が支配的で、セパレータ高さの小きくなると構造抵抗が大きくなり、この間に圧力損失が最小となるセパレータ高さが存在することが分かった。折り込み深さが一定(274mm)の場合、最適セパレータ高さは入口部平均流速に関係なく約1.5mmであることが分かった。この最適セパレータ高さは、ろ材の抵抗係数が大きくなるほど、ろ材折り込み深さが小きくなるほど、小きくなることも明らかになった。このような実験結果は数値計算結果とよく一致した。

4. 3次元モデルフィルタの圧力損失特性

実際のフィルタユニットと同じ構造を持つ3次元モデルフィルタに対して、流体力学計算用汎用プログラム(FIDAP)を使用し、3次元モデルフィルタ内部の流れの数値解析を行い、実験結果と比較した。その結果、3次元モデルフィルタの圧力損失の測定値は、セパレータ高さが大きいところでは数値解析結果とよく一致するが、高さが2.0mmより小きくなると、その差は大きくなる。一方、数値解析により、セパレータの折り角の影響について検討した結果、セパレータ高さの小きい場合、折り角が大きくなると圧力損失は大幅に減少するが、セパレータ高さが大きい場合は、その減少幅は小きい。また、セパレータ高さ、ろ材抵抗係数、セパレータ折り角度が変わると、水平ろ材通過流速分布は流れ方向には変化するが、流れに直角断面では変化しない。さらに、折り角度が大きくなるにつれ、同じセパレータ高さを持つ2次元モデルフィルタの圧力損失の値に漸近することが分かった。実験の結果、セパレータ高さ、ろ材抵抗係数に対する圧力損失の傾向は2次元モデルの場合と同様であるが、流路での構造圧力損失が2次元モデルの場合より大きいことが明らかになった。また、フィルタ折り込み深さを変化させた結果、あるろ材抵抗係数を持つろ材に対して、最適セパレータ高さと最適フィ

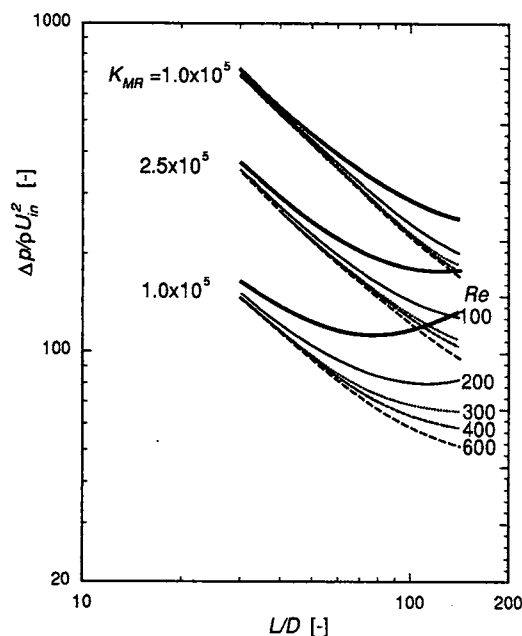


Fig. 4 Change in dimensionless pressure drops with the L/D at various Re and K_{MR} .

ルタ折り込み深さが存在することが確認された。

セパレータ折り角 90° の3次元モデルの場合について、最適セパレータ高さの推定式を求めた結果、次式が得られた。 $h_{opt}=16.3L^{0.721}C_m^{-0.279}$

5. 超微粒子用高性能ろ材構造検討

先端産業の高い空気清浄度の要求から、ナノメートルサイズの超微粒子までが除去対象となり、繊維層フィルタを構成する繊維の微細化が著しく進んだ。この場合、繊維層フィルタによる超微粒子の捕集は、おおよそ $Re < 0.003$, $0.01 < Pe < 10$ の範囲で行われ、粒子のブラウン拡散が主な捕集機構である。そこで、超微粒子を超微細繊維層からなるフィルタで捕集する場合について、実験およびシミュレーションから対数透過則の適用性について検討した。フィルタのモデルであるちどり配列円筒群の流れと濃度分布の数値解析より、 $Pe=1$ 程度になると Pe 数をさらにそれ以上減少させても単一繊維捕集効率はある値以上に増加しないことが分かった。この値はろ材の空間率から決定されるもので、空間率を大きくすれば、さらに単一繊維捕集効率は増加することが分かった。このような結果は、各種フィルタを用いた粒子捕集実験によっても確認できた。このことによりろ材の空間率を大きくすれば圧力損失は低くなり、高効率、低圧損のろ材になることを結論づけることができる。一方、超微粒子特有の問題として標準ナノメートルサイズ粒子の円管による捕集効率測定から、粒径が3nm以下になると壁面での跳ね返りの現象が生じることが明らかになった。

6. 結 論

セパレータ型フィルタユニットの流れと圧力損失を代表できるモデルフィルタを提案し、数値解析と実験を行うことにより、フィルタユニットの圧力損失と流れの特性を把握した。また、フィルタユニット設計のための重要な因子である最適セパレータ高さをろ材抵抗係数とろ材折り込み深さの関数として整理した。

さらに、 $Pe < 10$ 領域での微細繊維層による微小粒子の捕集実験、数値解析の結果から、空間率が高いほど単一繊維捕集効率は大きく、圧力損失は低くなり高効率低圧損のろ材になることが明らかになった。また、3nm 以下の粒子の壁面での跳ね返り現象が確認できた。

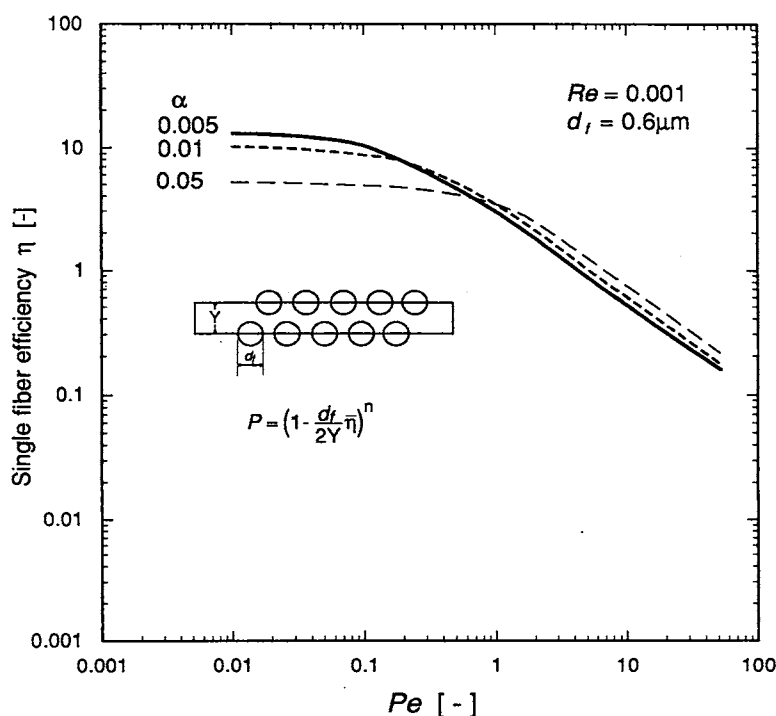


Fig.5 Changes in single fiber efficiency of staggered array of cylinders at various packing densities.

学位論文の審査結果の要旨

本学位論文に関し、2月3日に第1回審査委員会を開き、面接審査の後、論文内容を詳細に検討した。さらに2月9日に行われた口頭発表の直後に第2回審査委員会を開き協議の結果、以下のよう
に判定した。

半導体産業は間もなく1 Gbit 時代に入ろうとしている現在、超 LSI の製造環境はクリーンルームの省力化、ナノサイズ粒子、汚染ガスの効率的除去法の確率の方向へ向かっている。本論文は超清浄空間を創る担い手である超高性能エアフィルタ (HEPA フィルタ) ユニットの低圧力損失化を目的とし、プリーツ状に折り込まれているフィルタユニットを通る流れの数値解析から、ユニット全体の圧力損失をプリーツ間隙の圧力損失と濾材そのものの圧力損失に分け、一定量に対して全圧力損失が最小となる折り込み密度が存在することを示し、実験的にその妥当性を確かめている。すなわち論文では、まず流れの相似則から、ある濾材抵抗以下では低 Re 数である無次元折り込み深さで圧力損失が最小値をもつことを示した上で、2 次元および 3 次元モデルフィルタについての理論的、実験的に検討し、最適セパレータ高さの推定式を提案し、フィルタユニットを設計する上での重要な指針を与えた。さらにナノサイズ粒子を対象とした高性能濾材構造については、ペクレ数が 0.5 以下では現在実用に供されているフィルタの充填率 (0.05 程度) を 1/10 にしても粒子の捕集性能は変わらず、従って大幅に圧力損失を低くできることを示唆する結果を得た。

以上の研究成果は超清浄空間を創る上で重要な役割を果たしている HEPA フィルタユニットおよび濾材の設計に重要な知見を与えるものとして高く評価され、博士 (工学) の学位に値するものである。